V-15-E-1-1945

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.

ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS QUIMICAS.

PRODUCCION DE GASES COMBUSTIBLES POR FERMENTACION ANAEROBICA DE LA CELULOSA.

ESTE LIBRO NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

TESIS que para obtener el título de Ingeniero Químico presenta el alumno,

Luis Carlos Rojas R.

México D. F., Agosto de 1945.

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A LA MEMORIA DE

MI PADRE.

A MI HERMANO,

EL DR. RAUL ROJAS R.

A MI MADRE.

A LA SRITA.

TERESA RODRIGUEZ.

AL LIC.

SEBASTIAN ALLENDE

I.- FERMENTACION ANAEROBICA DE LA CELULOSA.

II.- FERMENTACION DE RESIDUOS VEGETALES CELULOSICOS.

III.- GASES PRODUCIDOS. ANALISIS. PODER CALORIFICO.

IV.- INSTALACION INDUSTRIAL.

V.- CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA.

I

FERMENTACION ANAEROBICA DE LA CELULOSA.

Entre los diferentes productos de la asimilación clorofiliana, la celulosa ocupa, cuantitativamente, el lugar más importante, ya que la sustancia seca de los vegetales contiene de un 40 a un 60 % de celulosa, en términos generales. Debido a esto su descomposición adquiere relieves fundamentales en la economía natural, puesto que es la causa del retorno a la atmósfera, de una gran parte del anhidrido carbónico consumido por las plantas.

La celulosa suministra energía a una gran variedad de microorganismos: Algunos viven exclusivamente a expensas de ella y otros sólo la utilizan parcialmente como fuente energética. En numerosos casos se unen varios microorganismos simbióticamante para poderla utilizar como alimento.

Los productos de la fermentación de la celulosa suministran por regla general, energía a otros seres que pueden ser desde bacterias, artrópodos y moluscos hasta cordados.

La celulosa puede formar parte de sustratos diferentes y las características de éstos determinan la clase de microorganismos que pueden utilizarla en su metabolismo; así por ejemplo los microorganismos que atacan la celulosa de los tejidos de

plantas en desarrollo son fundamentalmente hongos inferiores filamentosos;los que descomponen la celulosa en el aparato digestivo de insectos y animales superiores son bacterias anaeróbicas, aun cuando también pueden existir aeróbicas en este medio; en el tratamiento de aguas negras y desperdicios municipales se encuentra una flora compuesta de bacterias aeróbicas y anaeróbicas, termo y mesofílicas; en otros tipos de fermentación de la celulosa, como es el caso que se presenta en la preparación de abonos, encontramos también gran número de hongos, actinomicetos y posiblemente hasta algunos invertebrados. La descomposición bacteriana de la celulosa, que da origen a gases combustibles es provocada casi exclusivamente por bacterias anaeróbicas que pueden ser meso o termofílicas y aun cuando los resultados más halagadores se han obtenido con las primeras, las fermentaciones efectuadas con las segundas proceden con mayor velocidad y esto abre una puerta a la investigación del mejoramiento y adelanto del proceso. Hasta ahora se han obtenido de las fermentaciones termofílicas de la celulosa, casi exclusivamente, huellas de hidrógeno, ácidos grasos, alcohol etílico y acetona; en muy contados casos se ha reportado la producción de metano.

Breve reseña histórica.

Numerosos investigadores han dedicado atención, en sus trabajos, a este proceso y para no extenderme demasiado, solamente mencionaré aquellos que, a mi juicio, más han contribuido al conocimiento de los diversos aspectos, rendimientos y condiciones bajo las cuales se verifica, esta fermentación.

El estudio de la descomposición de la celulosa por fermentación se inició en la segunda mitad del siglo pasado pero no fué sino hasta después de la guerra de 1914, cuando se llegaron a efectuar estudios encaminados hacia su aplicación industrial como una fuente de gases combustibles.

En 1865, Mitscherlich observó un bacilo capaz de remover la cutícula celulósica de los granos del almidón de patata y esto lo hizo suponer que ciertos microorganismos eran los causantes de la desaparición de la celulosa en la naturaleza, impidiendo su acumulación.

Reiset encontró metano, en 1856, en los gases que se desprendían del estiércol cuando se encontraba amontonado.

Trecul, años más tarde, descubrió ciertos cuerpos que descomponían la celulosa y por teñirse de azul con el iodo, los llamó Amylobacter; Van Thieghem demostró después que se trataba del Vibrion butyrique de Pasteur y que era el mismo descubierto por Mitscherlich.

Popoff publicó en 1875, sus estudios acerca de la formación de metano en los pantanos y en la fermentación de numerosos productos como papel filtro, patatas, goma arábiga, heno, glucosa y algunas sales de ácidos grasos. El gas que obtuvo durante un período de dos meses tenía una composición tal, que satisfacía la

proporción: $CH_4 : CO_2 = 1 : 1$ y afirmó que esta relación era característica de la celulosa.

Los primeros estudios cuantitativos encaminados a dilucidar la reacción según la cual se produce metano, los efectuó Hoppe Seyler que concluyó de ellos que la descomposición metánica de la celulosa se podía condensar de la siguiente manera:

$$(C_6H_{10}O_5) + H_2O = C_6H_{12}O_6; \quad C_6H_{12}O_6 = 3CO_2 + 3CH_4 ,$$

confirmando la aseveración de Popoff.

Van Senus, en sus trabajos publicados en 1890, atribuyó la fermentación de la celulosa a la acción conjunta de diversas bacterias.

Numerosos experimentos fueron hechos por Omelianski y en sus trabajos, que han llegado a ser clásicos, afirmó haber fermentado celulosa con cultivos puros de dos anaerobios: El Bacillus methanizenes, productor de anhidrido carbónico y metano y el B. fossicularum (B. fermentationis cellulosae) que da lugar a la formación de anhidrido carbónico e hidrógeno. En la fermentación producida por el B. fossicularum recuperó 65 % del peso de la celulosa agregada, como ácidos acético y butírico, 29% como anhidrido carbónico y solamente un 4% como hidrógeno. En la fermentación metánica obtuvo: 50% del peso de la celulosa fermentada como ácidos acético y butírico, 7% como metano y 42 % como anhidrido carbónico.

La pureza de estos cultivos ha sido puesta en duda posteriormente, por diversos investigadores.

Sönngen demostró que era posible efectuar biológica y cuantitativamente la reacción :

$$4H_2 \quad CO_2 = CH_4 + 2H_2O$$

burbujeando hidrógeno y anhídrido carbónico [illegible] activo.

Pringsheim fué el primero en dar la información acerca de la simbiosis que existe entre los microorganismos que descomponen la celulosa y los que fijan el nitrógeno del aire. También demostró que la celulosa, en su descomposición bacteriana, sufría inicialmente la acción de un enzimo, la celulasa, que catalizaba su descomposición en celobiosa, sustancia que a su vez era afectada por otro enzimo, la celobiasa.

Fowler y Joshi, en 1920, hicieron el primer intento de industrializar la fermentación de la celulosa con el objeto de utilizar los gases producidos por ella como fuente de energía térmica. Emplearon diversos materiales celulósicos y utilizaron cieno de cloacas para efectuar la inoculación. Obtuvieron muy bajos rendimientos y a pesar de afirmar que podían obtener el 80% del volumen ocupado por el material en fermentación de gases con una composición de 81% de metano, 14.5% de hidrógeno y el resto de anhídrido carbónico, no aclararon durante cuanto tiempo podían mantener este rendimiento.

En 1923 un grupo de investigadores, bajo la dirección de Sir Frederic Natham, publicó los resultados de una discusión acerca de la acción bacteriana sobre materiales celulósicos y en él hace ver las posibilidades que existen del aprovechamiento de los desperdicios del algodón desde el punto de vista de la producción de metano y anhídrido carbónico; pero, por el momento, no encontró económicamente factible el proceso.

Heukelekian y Rudolfs estudiaron la distribución de la celulosa y materiales celulósicos en las aguas negras y encontraron que su presencia provoca un retardo en la digestión de la materia orgánica, una mayor concentración de ácidos orgánicos, una disminu-

ción en el pH y un aumento en el contenido de CO_2 de los gases que se desprenden.

Rudolph y Heisig estudiaron la digestión de los sedimentos de las aguas negras pero su fermentación celulósica se acumuló en la parte superior del tanque formando una costra gruesa que no pudo ser digerida e impidió el desprendimiento de gases.

Waksman, asociado con otros investigadores, publicó diferentes trabajos acerca de la fermentación celulósica en los que fijó su atención sobre el origen y naturaleza de hongos y bacterias del suelo, sobre el control de los factores que afectan el desarrollo de estas bacterias y además estudió la descomposición de la madera por la acción biológica de microorganismos.

Coolhaas, en 1926, estudió el efecto de las bacterias termofílicas sobre la celulosa, algunos otros carbohidratos y ácidos grasos y sus sales.

En 1930, Defcault, trabajando indistintamente con aerobios y anaerobios, ambos termofílicos, en cultivos mezclados, demostró la presencia de celulasa que Simola confirmó estudiando la fermentación aeróbica de la celulosa, efectuada por el Cellulobacillus myxogenos y el Cellulobacillus mucosus.

En los últimos años las más minuciosas investigaciones acerca de la fermentación celulósica y sus aplicaciones industriales han sido hechas por Boruff, Baswell y sus discípulos; a sus investigaciones se debe el hecho de poder efectuar esta fermentación en escala industrial con probabilidades de éxito económico.

Cultivos de bacterias utilizados en esta fermentación.

La descomposición metánica de la celulosa es el resultado de la acción compleja de diversas bacterias y existe la más completa convicción de que no hay bacterias que, atacando la celulosa, produzcan metano directamente. Las bacterias que destruyen la celulosa producen ácidos grasos inferiores, dióxido de carbono, hidrógeno y alcohol etílico. Estas sustancias sufren posteriormente la acción de nuevas bacterias pudiendo (en algunos experimentos de laboratorio se ha logrado) ser transformadas cuantitativamente en metano y anhídrido carbónico.

Aunque Omelianski afirmó haber obtenido cultivos puros de dos bacterias que fermentaban la celulosa y de las cuales una producía metano, Kellerman, McBeth y Scales reportaron que el método empleado por Omelianski no daba resultados satisfactorios y siguiéndolo en todos sus detalles obtuvieron un cultivo mezclado en el que encontraron cinco especies diferentes de bacterias.

Los cultivos que se han empleado hasta ahora con el objeto de obtener metano, son cultivos mezclados obtenidos de fuentes muy diversas como lo son el cieno del fondo de ríos y lagos, los lodos de asentamiento de tanques sépticos anaeróbicos así como el líquido de reboso de estos tanques, el estiércol y materias fecales y de igual manera sus extractos.

Como por regla general, estos materiales ya contienen los elementos indispensables para el desarrollo activo de las bacterias, necesarios para la descomposición bacteriana de la celulosa, ya en sí constituyen cultivos que pueden emplearse directamente para inocular las sustancias celulósicas que van a someterse a la fermentación.

Cuando los materiales que se van a utilizar en la inoculación no están fermentando activamente, se les puede agregar lo siguiente:

K_2HPO_4 ---------- 100 mg/lt

$Mg_3(PO_4)_2$ ---------- 100 mg/lt

$(NH_4)_2SO_4$ ---------- 100 mg/lt

Papel filtro en trozos pequeños con una rapidez de 1.5 gm/lt por día.

En dos o tres días, las bacterias indispensables para esta fermentación, estarán desarrollando toda su actividad.

La flora bacteriana puede sufrir alteraciones en su composición debido a factores ecológicos que provocan la acidificación del medio y que inhibe la acción de las bacterias productoras de metano propiamente dichas, causando la desaparición de este gas entre los productos finales de la fermentación en incrementando la formación de CO_2.

Casi siempre basta corregir determinados factores para que en poco tiempo se restablezca la normalidad, siendo contados los casos en que hay que reinocular el medio, bien sea por nuevas adiciones de material inoculante o circulando lentamente el material afectado por un tanque en el cual se está verificando normalmente una fermentación de este tipo.

La circunstancia de no tener necesidad de mantener un cultivo puro de determinadas bacterias le da una gran ventaja a esta fermentación pues sin dificultad alguna se efectúa continuamente, hecho que en otras fermentaciones presenta obstáculos difíciles de salvar.

Las bacterias necesitan un soporte para poder propagarse convenientemente y cuando el material sometido a la fermentación es fibroso o presenta una gran superficie, llena satisfactoriamente

esta necesidad. Cuando la sustancia sometida a la fermentación es líquida, se satisface este requerimiento utilizando asbesto molido. Con respecto a esto último, cabe hacer una observación interesante: Este tipo de fermentación no solamente es aplicable a la celulosa y sus portadores sino que la descomposición con desprendimiento de metano y dióxido de carbono tiene lugar en muy diversas sustancias y se ha llegado a investigar con éxito, la fermentación metánica de más de cien sustancias orgánicas diferentes y diversos productos animales y vegetales de desecho.

Mecanismo de la fermentación.

La constitución de la celulosa en general, se conoce perfectamente y sólo quedan pendientes detalles acerca de su estructura molecular y la forma de agregación de las unidades que forman la macromolécula. La unidad más sencilla que forma la molécula de celulosa es la β-glucosa que se obtiene según rendimientos casi cuantitativos de la hidrólisis de la celulosa. La unión de las moléculas de glucosa es uniforme a lo largo de la cadena que constituye la molécula de celulosa y por metilación total, seguida de hidrólisis, se concluye que los eslabones que forman la celulosa están unidos por los carbonos 1 y 4 de la molécula de β-glucosa, ya que como resultado del proceso antes dicho se obtiene 2-3-6 trimetilglucopiranosa.

La confirmación de la estructura de la celulosa la han dado los datos acerca de la refracción de los rayos X, que indican que las fibras de celulosa muestran periodicidad a lo largo de ellas, cada 10.25 Å que se sabe es la longitud de dos unidades de anhidroglucosa, cuya union se encuentre en los carbonos 1 y 4. Por medio de modelos de la molécula se ha llegado a la conclusión de que las moléculas de β glucosa, para poder dar una cadena rectilínea al unirse por los carbonos ya mencionados, es necesario que giren alternadamente 180 °. Esto podía dar la apariencia de que la celulosa está constituida por la unión de diferentes moléculas de un disacárido, la celobiosa, pero no hay ninguna diferencia entre la ligadura que formaría este disacárido y la que uniría una molécula con otra del mismo para formar la celulosa. Además, controlando la hidrólisis de la celulosa, se han obtenido fragmentos compuestos de tres, cuatro o más moléculas de glucosa enlazadas.

La longitud de la molécula de celulosa y por lo tanto su peso molecular, ha sido motivo de discusiones pero parece que depende de su origen, variando de acuerdo con él; se supone que las unidades de β-glucosa que constituyen la celulosa varían de 100 a 200. Además existe la creencia de que la cadena que constituye la molécula de celulosa no es simple sino que se enlazan unas con otras aproximadamente cada 30 o 40 eslabones.

Existen cadenas entre las que se encuentran eslabones con menor número de átomos de carbono que los de la β-glucosa, constituidos por moléculas de xilosa o manosa. A estas cadenas se les dá el nombre de celulosanos y su longitud es menor que las de la verdadera celulosa. Son más atacables por los ácidos diluídos y los álcalis, que la celulosa.

Una característica muy importante de la celulosa es su insolubilidad en el agua, lo que hace que las bacterias que la utilizan como fuente energética necesitan disponer de un sistema enzimático hidrolítico extracelular que produzca, a costa de la celulosa, sustancias solubles que puedan pasar a través de la membrana celular.

Debido a la enorme variedad de formas en que es atacada la celulosa en la naturaleza, por las bacterias, poco se conoce acerca de este sistema enzimático y existen pocos datos acerca de él.- Pringsheim sometió fragmentos de papel filtro a la acción bacteriolítica y vigilando las variaciones en la composición del medio de cultivo, detuvo la fermentación al aparecer las primeras huellas de glucosa. Al hacer el análisis encontró celobiosa que identificó por medio de su osazona. A otro medio le agregó nitrato de calcio una vez que la fermentación se había iniciado y de este modo impidió que se efectuara la fermentación de la glucosa que se iba formando por descomposición de la celobiosa. Estos experimen-

tos fueron hechos con cultivos mezclados y Simola, otro investigadordor, los llevó a cabo con cultivos puros de Cellulobacillus myxogenes y Cellulobacillus mucosus, afinando más aún el método, de la siguiente manera:

Desarrolló el cultivo en un medio que contenía extracto de carne, peptona, yeso y papel filtro. Después de ocho días de desarrollo a 37 °C, centrifugó y lavó el papel filtro en el cual se encontraban adheridos los microorganismos y los resuspendió en 500 cc. de agua de la llave a la cual agregó un fosfato como sal buffer para mantener un pH de 6 y además, añadió tolueno que impide el desarrollo de las bacterias. Incubó lo anterior durante otros ocho días y evaporada el a gua encontró que el residuo era fuertemente reductor. Contenía 102 mg de glucosa que fué identificada en el extracto alcohólico de este residuo y además encontró una cantidad mayor de celobiosa, 346 mg, que identificó tanto por polarimetría: $(\alpha)_D^{20} = 35.00$, como por su osazona.

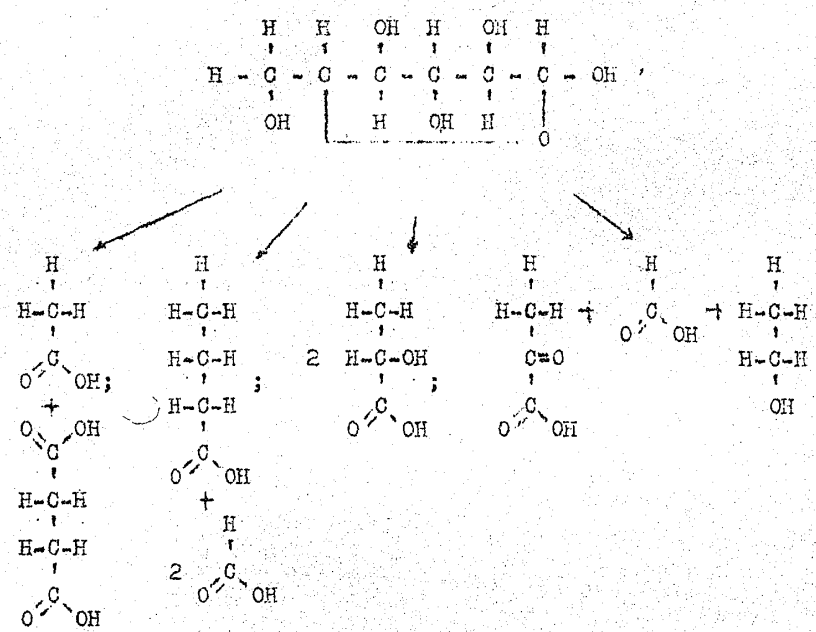
Otro método que también se ha seguido consiste en elevar la temperatura para inhibir el desarrollo de las bacterias pero no lo suficiente para que no actúen los enzimos. Como la temperatura de inactivación de la celobiasa es menor que la de la celulasa, elevándola entre 67 y 70 °C tiene lugar la acumulación de celobiosa sin su hidrólisis ulterior a β-glucosa. Es sorprendente, teniendo en cuenta que el efecto aprovechable de los enzimos es la solubilización de la celulosa, el ataque posterior de la celobiosa descomponiéndola en β- glucosa puesto que la celobiosa es soluble.

De los anteriores experimentos se deduce que la primera fase de esta fermentación es rpoducida por un sistema enzimótico

hidrolítico extracelular que solubiliza la celulosa por medio de su hidrólisis a celobiosa y posteriormente a β-glucosa, las que, debido a su solubilidad, pasan al interior de las bacterias en donde sufrirán la acción de los sistemas enzimóticos intracelulares.

Probablemente en el interior de las células tienen lugar oxido-reducciones internas que son facilitadas por la uniforme distribución de los oxígenos dentro de la molécula de los glúcidos. Estas oxido-reducciones internas son las que suministran energía a las células y dan lugar a la desintegración de la molécula originando ácidos grasos inferiores como fórmico, acético, propiónico, láctico, pirúvico, butírico y succínico; también se forma alcohol etílico, hidrógeno y anhidride carbónico.

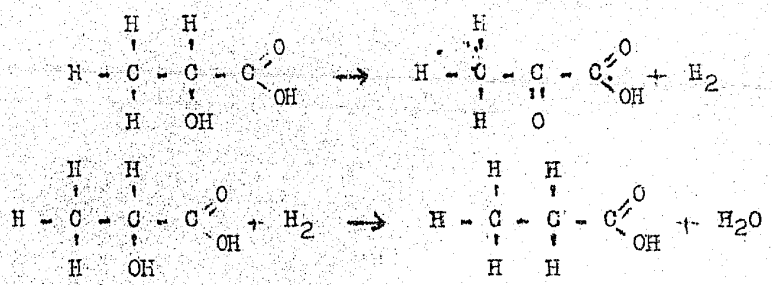
Un esquema hipotético de estas oxido-reducciones internas, considerando que se verifican en la glucosa, es el siguiente:



Cuando la fermentación se efectúa con cultivos mezclados, la formación de estos ácidos se pone de manifiesto por muy diversos métodos, ya sea disminuyendo las condiciones anaeróbicas del cultivo, no suministrando la cantidad indispensable de nitrógeno amoniacal al medio, aumentando excesivamente la presión o alimentando fuertes cantidades de material celulósico.

Estos ácidos se forman siempre que la celulosa se somete a la acción fermentativa de cultivos puros de bacterias que la atacan como son los que empleó Simola, ya mencionados y el B. Cellulosae dissolvens, aislado por Mme. Khouvine.

Los ácidos formados sufren posteriormente descarboxilaciones sucesivas y en un principio se supuso, de acuerdo con la teoría de Knoop, que se oxidaban en el carbono beta. Para comprobar esto, se fermentaron directamente ácidos grasos fenilsustituidos con el objeto de analizar los residuos de la destrucción metánica pero el anillo bencénico se destruyó y el método no fué de ninguna utilidad. Sin embargo, durante esta fermentación se tuvo el cuidado de analizar continuamente los productos formados intermediariamente y por la naturaleza de estos productos se llegó a la conclusión de que el fenómeno consistía de una alfa oxidación. Así, en la fermentación del ácido butírico se encontraron como productos intermedios, ácidos propiónico y acético; en la del ácido propiónico, ácidos acético y fórmico y en la del acético se encontró fórmico. Al fermentar el ácido láctico se encontró como producto intermedio ácido propiónico pero esto no es una objeción ya que al oxidarse el ácido láctico a pirúvico se desprende hidrógeno que reduce otra molécula de ácido láctico a propiónico:



Es muy probable que estas oxidaciones sean hidrolíticas y que se efectúen de la siguiente manera:

$$R - CH_2 - COOH + H_2O \rightarrow R - CHOH - COOH + H_2$$

$$R - CHOH - COOH \rightarrow R - CO - COOH + H_2$$

$$R - CO - COOH + H_2O \rightarrow RCOOH + HCOOH$$

$$2HCOOH + 2H_2 \rightarrow 2H_2O + CH_4 + CO_2$$

Cuando por alguna de las causas mencionadas se vuelve el medio ácido, aparece hidrógeno entre los gases producidos lo que hace más verídica la anterior suposición. Entre los gases que se desprenden en una fermentación fermónica normal, no se encuentra hidrógeno, lo que se explica debido a los experimentos de Söhngen y comprobadas después por otros investigadores.

Si se hace pasar una mezcla de hidrógeno y anhidrido carbónico por un cultivo en plena actividad y si se analizan los gases resultantes, se encuentra que los resultados cuantitativos corresponden a la siguiente reacción.

$$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$$

Probablemente estos experimentos dán la clave de la fase de la fermentación que dá lugar a la formación de metano.

Considerando globalmente y desde el punto de vista químico, los resultados de esta fermentación, se ha formulado una ecuació

que ha sido comprobada por los resultados de Symons y Buswell cuyos datos se dán a continuación de dicha ecuación.

$$C_nH_aO_b + (n - \frac{a}{4} - \frac{b}{2})H_2O \longrightarrow (\frac{n}{2} - \frac{a}{8} + \frac{b}{4})CO_2 + (\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4})CH_4$$

SUMARIO DE DATOS OBTENIDOS EN EXPERIMENTOS EN LOS QUE SE HIZO UN BALANCE DE CARBONO COMPLETO.

A.- Condiciones de la experimentación y del sustrato:

Sustrato:	gms alimentados.	Temp °C	Duración Días	Vol. del cult.	Asbesto. gms	Inoculación: Fuente	Libre de cenizas	Carbono en el sustrato
Celobiosa	10.0	35.0	35	2.0	50	L[b]	2.60	4.25
Dextrosa	1004.0	29.5	136	7.3	--	S[c]	136.80	402.0
Dextrosa	682.0	33.1	185	7.3	135	L-A[e]$_2$	67.40	272.5
Etilenglicol	38.7	35.0	75	2.0	50	L-A$_4$	1.96	14.98
d-Galactosa	9.9	35.0	35	2.0	50	L	2.64	4.05[f]
Lactosa	258.6[g]	34.7	74	7.3	175	L-B$_2$	24.80	108.90
Levulosa	26.5	35.0	75	2.0	50	L-A$_4$	1.96	11.77
Maltosa	10.0	35.0	33	2.0	50	L	2.64	4.33[f]
d-Manitol	79.6	35.2	45	7.3	185	L-A$_4$	3.90	31.40
Rafinosa	21.0[g]	35.0	100	2.0	50	L	2.80	9.0
Sacarosa	70.8	35.0	105	2.0	50	L-A$_4$	6.4	29.80
Xilosa	474.0	31.1	46	7.3	--	S	257.00	189.30
Xilosa	242.5	30.7	70	7.3	185	L-A$_2$	14.00	97.09[h]

B.- Productos:

Sustrato	CO_2 gms	CH_4 gms	gms	% del total alimentado	Carbono protoplásmico: gms	% del total alimentado	Carbono total: gms	% del total alimentado
Celobiosa	1.60	1.6	3.2	75.3	1.01	23.8	4.21	99.1
Dextrosa	174.43	175.05	349.48	87.0	48.50	12.1	398.75[d]	99.3
Dextrosa	123.10	124.8	247.9	91.0	19.30	6.9	267.20	97.9
Etilenglicol	4.83	8.06	12.89	86.1	1.75	11.7	14.54	97.8
d-Galactosa	1.69	1.66	3.35	82.6	0.80	19.7	4.16	102.3
Lactosa	50.50	49.7	100.2	92.1	7.00	6.8	107.60	98.9
Levulosa	4.76	5.03	9.79	83.0	1.35	11.5	11.44	94.5
Maltosa	1.79	1.78	3.57	82.4	0.79	18.2	4.36	100.6
d-Manitol	13.00	15.20	28.20	89.5	4.10	13.0	32.30	102.5
Rafinosa	3.91	4.00	7.91	87.9	1.00	11.1	8.91	99.0
Sacarosa	12.20	13.10	25.3	85.0	3.9	13.1	29.2	98.1
Xilosa	86.42	92.07	178.49	94.3	15.30	8.0	193.80	102.3
Xilosa	46.11	45.98	92.09	94.7	4.95	5.1	97.04	99.8

Sustrato:	Molos CO_2 / Molos CH_4 Real	Molos CO_2 / Molos CH_4 Teórico	Sustrato:	Molos CO_2 / Molos CH_4 Real	Molos CO_2 / Molos CH_4 Teórico
Celobiosa	1/1	1/1	Levulosa	0.944/1	1/1
Dextrosa	0.996/1	1/1	Maltosa	1.005/1	1/1
Dextrosa	0.986/1	1/1	d-Manitol	11.08/13	11/13
Etilenglicol	2.994/5	3/5	Rafinosa	0.978/1	1/1
d-Galactosa	1.018/1	1/1	Sacarosa	0.953/1	1/1
Lactosa	1.028/1	1/1	Xilosa	0.938/1	1/1
			Xilosa	1.003/1	1/1

([a]).- Ganancia en nitrógeno orgánico x 5. ([b]).- Licor de la digestión anaeróbica de desperdicios domésticos. ([c]).- Lodos de la digestión anaeróbica de desperdicios domésticos.
([d]).- 0.75 gms de carbono recuperados como ácido láctico.
([e]).- Líquido del experimento A_2. ([f]).- Incluye el carbono en 0.28 gms de ácido acético descompuesto, del material inoculante.
([g]).- Anhidra. ([h]).- Incluye el carbono en 0.12 gms de ácido acético y 0.24 gms de ácido láctico descompuestos, del material inoculante.

Consideraciones termodinámicas.

A continuación se reproduce un fragmento del artículo: "La fermentación metánica de los carbohidratos. G. E. Symons; A. M. Buswell. J. Am. Chem. Soc. 55; 2028; 1933."

" la fuerza que motiva la degradación bacteriana de la materia orgánica es la adquisición de energía y un vistazo a la energética relacionada con estas reacciones es de interés en este punto. Se ha demostrado que el uso de calores de formación y calores de combustión no dan una información cierta con respecto a la energía de una reacción y el criterio apropiado es la disminución de la energía libre. Se ha demostrado también que el uso de energías libres en un esta de tipo no es un criterio correcto debido al cambio en el contenido de energía libre con la concentración y la temperatura. Diferentes factores no determinables fácilmente entran también en consideración y hacen el cálculo de la verdadera disminución de la energía libre, imposible. Sin embargo, la disminución de la energía libre en la reacción para todos aquellos para los que se conoce la energía libre de formación, se ha calculado en un estado tipo. En todos los casos se ha encontrado que la reacción cede energía o sea ΔF es negativa"

"El agua es la única fuente de oxígeno, además del que ya se encuentra en el compuesto fermentando, teniendo lugar la mayor disminución en el contenido de energía libre cuando el dióxido de carbono y el metano son los productos finales. Considerando que la reacción es por pasos, como se sugirió antes, parece que la mayor parte de los pasos intermedios (para los que hay datos de energía libre) tienen lugar con una disminución de la energía libre. El paso que comprende el ácido pirúvico parece que necesi

ta energía, pero esta reacción puede tener lugar con una disminución en el contenido de energía libre a las concentraciones que existen en el sistema bacteriano. Se ha sugerido también que las bacterias pueden hacer trabajo sobre una reacción intermediaria si pueden obtener energía de la reacción total".

"La cantidad de energía utilizable por el organismo parece que es del mismo orden de magnitud que el previamente reportado. En esta investigación sólo una pequeña parte del sustrato fué convertida en material protoplásmico de las bacterias. La fermentación del remanente fué más que suficiente para las necesidades de energía. Boruff y Buswell calcularon, de los calores de combustión, que el 6.7% de la energía total utilizable de la completa oxidación de la celulosa, la pierden las bacterias por su fermentación a dióxido de carbono y metano. Un cálculo análogo, usando la energía libre en estados tipos, se hizo para las sustancias de esta investigación. Las pérdidas variarín mucho: Para carbohidratos el promedio es de cerca de 12%".

FACTORES ECOLOGICOS.

Temperatura.

Como la flora bacteriana que toma parte en esta fermentación está formada por microorganismos tanto mesofílicos como termofílicos, la proporción en que se encuentren unos con respecto a los otros determinará la temperatura óptima. En general, la flora que predomina en los medios naturales empleados para inocular en este tipo de fermentación, es la mesofílica y su acción llega a un óptimo que se encuentra entre los 30 y los 32 °C. Naturalmente que estos datos no pueden ser generalizados y cada caso necesita consideraciones particulares y pruebas, pues no podemos suponer que la flora que constituye los cultivos mezclados empleados en esta fermentación tenga una composición bacteriana uniforme, ya que su origen puede ser muy variado y la presencia de diferentes especies de bacterias está condicionada por factores que no podemos controlar.

Las pruebas que mejores resultados han suministrado, como se dijo antes y como se verá en la tabla de datos a este respecto, han sido las efectuadas a 30 - 32 °C; sin embargo, la descomposición de la celulosa, sin tomar en cuenta la naturaleza de los productos finales obtenidos, es mucho más rápida cuando la efectúan bacterias termofílicas que mesofílicas, solamente que en estos casos, la experimentación no ha sido encaminada hacia la producción de metano y en la mayor parte de los experimentos efectuados con bacterias termofílicas no se le ha dado importancia al análisis de los gases desprendidos. La fermentación termofílica ofrece el incentivo de resolver el problema de efectuar la fermentación con una velocidad mayor que la obtenida hasta ahora, lo

cual, ha consituido uno de los escollos más serios que se han presentado en la industrialización de este proceso. Las investigaciones hechas hasta la fecha con fermentaciones termofílicas de este tipo, se han encaminado más bién a la producción de ácidos y etanol.

Ya Omelianski encontró que su bacteria productora de metano era mesofílica y aun cuando la pureza de su cultivo haya sido rebatida después, es indudable que las diferentes especies encontradas después por Kellerman, McBeth y Scales en ese cultivo, eran todas mesofílicas. Imshenetskii y Boyarskaya reportaron la formación de metano al efectuar una fermentación termofílica con cultivos mezclados, lo que hace pensar en la existencia de bacterias productoras de metano termofílicas y quizá buscándolas e impidiendo la acidificación del medio (en todas las pruebas hechas hasta ahora resulta que la acidificación es el mayor enemigo de la formación de metano), se lleguen a obtener resultados halagadores.

A continuación se dan los resultados de investigaciones acerca de la temperatura (Fermentaciones Anaeróbicas.- A. M. Buswell y W. D. Hatfield.- Illinois State Water Survey, Bull. 32; 123; 1941. Ibidem, 125)

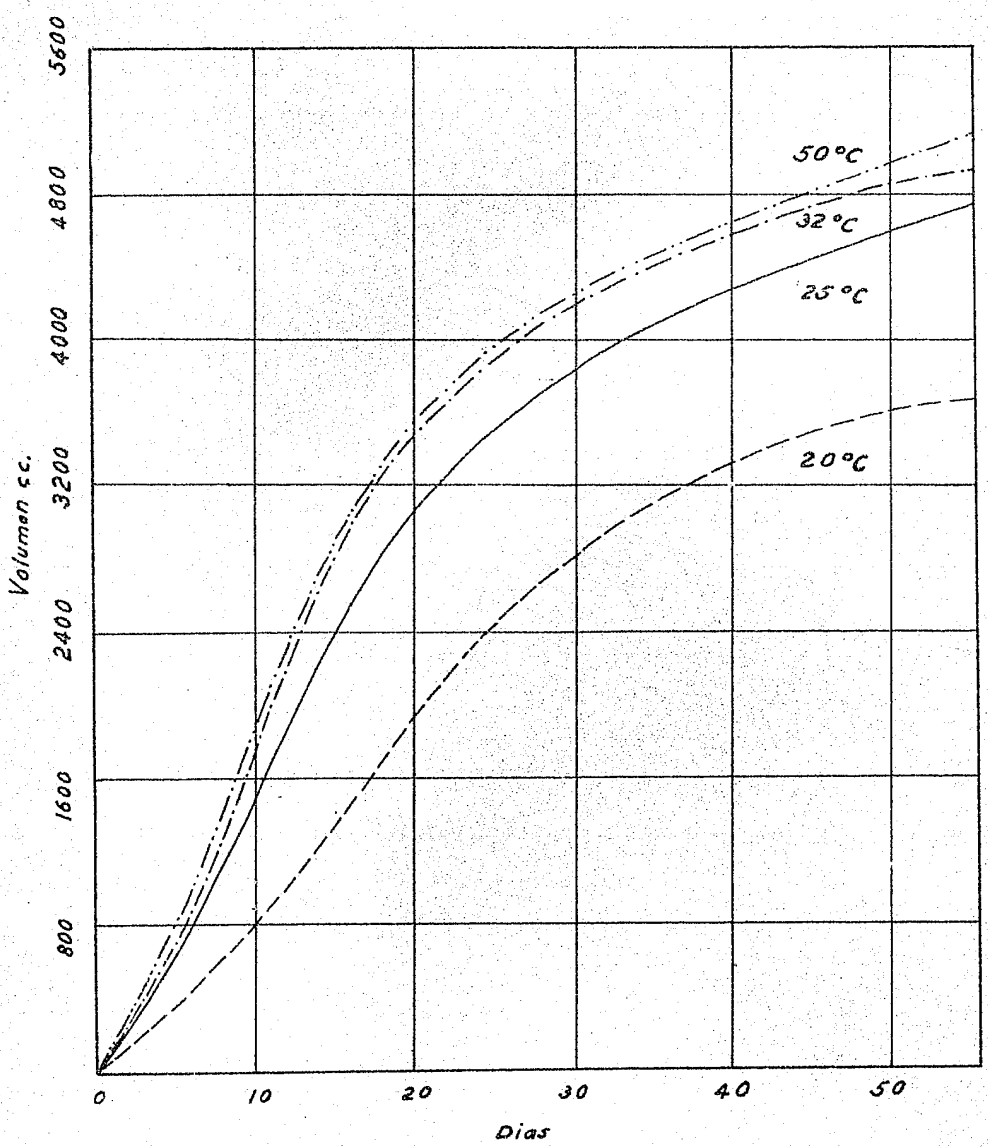
EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA VELOCIDAD DE FERMENTACION DE LA CELULOSA.[b]

Tiempo Días.	Gas total producido: cc.[a] 20°C	25°C	32°C	40 - 50 °C
5	35	387	541	250
8	65	---	891	510
13	180	988	1216	1164
23	554	1277	1514	1471
35	---	1377	----	----
43	992	1477	----	----
79	1037	1577	1566	1531

([a]).- Sin corregir por el aumento de CO_2 en el líquido madre.

([b]).- Se utilizaron 8.0 gms de papel filtro.

EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA VELOCIDAD DE FERMENTACION DEL RASTROJO



De los resultados expuestos en la tabla y en la gráfica anteriores se puede deducir que la temperatura más conveniente es la de 32 °C, en el caso de la fermentación de la celulosa, y en el caso del rastrojo es tan pequeño el aumento en el rendimiento de la fermentación efectuada a 50 °C sobre el de la llevada a 32 °C que el costo que reportaría mantener esa temperatura: 50 °C, no compensaría el incremento en el volúmen de los gases obtenidos a 32 °C.

La diferencia de rendimientos que existe entre 32 °C y 20 °C es tan notable que pagaría perfectamente el aislamiento del tanque y aún la utilización de parte del gas producido para efectuar su calentamiento.

pH y concentración de ácidos orgánicos.

Estos dos factores tienen una importancia fundamental, pues son la causa determinante del éxito o del fracaso en la obtención de gases combustibles por este procedimiento.

El pH óptimo se encuentra entre 6.5 y 7.5, desarrollándose mejor la fermentación del lado alcalino. Cuando el material que se alimenta es ácido, como es el caso de la pulpa resultante de la expresión del fruto del limonero, conviene agregar una sal buffer para acercar el pH lo más posible a los valores antes mencionados y efectuar la alimentación con pequeñas cantidades de material si la fermentación es intermitente o a una baja velocidad si es continua. En las primeras investigaciones hubo una tendencia muy marcada a neutralizar los ácidos formados en este proceso, agregando $Ca(OH)_2$ ó $CaCO_3$ pero no solamente los ácidos orgánicos dificultan la total fermentación con producción de metano sino también sus sales y debido a esto se obtuvieron muy bajos rendimientos de metano con un aumento correspondiente en la producción de ácidos. Como ejemplo se pueden citar los resultados obtenidos por Omelianski (Comptes rendus. CXXL; 653; 1895. Ibidem; XXV; 970; 1131; 1897)

Celulosa original	2.0815 gms
Celulosa remanente	0.0750 gms
Celulosa descompuesta	2.0065 gms

Productos:

Acidos orgánicos (acético, butírico)	1.0223 gms
Metano	0.1372 gms
Anhidrido carbónico	0.8678 gms
	2.0275

% de ácidos en los productos: 50.

Scott, Fred y Peterson, recientemente, efectuaron varias fermentaciones neutralizando el medio con $CaCO_3$ y Na_2CO_3 y aunque no reportaron la composición de los gases producidos, es interesante anotar algunos de sus resultados en los que se vé el gran rendimiento de ácidos que obtuvieron en los productos (Productos de la fermentación termofílica de la celulosa.- S. W. Scott, E. B. Fred y W. H. Peterson. Ind. and Chem. Eng. 22; 731 ; 1930).

RENDIMIENTO DE PRODUCTOS.

Por ciento de celulosa como productos. Medio con 2.8 % de celulosa.

	Cultivo crudo.	Cultivo enriquecido.	Cultivo purificado.
Acido no volátiles	0.5	3.1	3.8
Etanol	9.8	5.1	0.5
Anhidrido carbónico	23.2	17.3	10.0
Acido acético	40.3	57.5	52.9
Productos totales	73.8	83.0	84.2
Celulosa destruida	92.6	83.7	89.8

(En el cultivo purificado se encontraron además, 17.0 gms de glucosa)

La diferencia que existe entre "Productos totales" y "Celulosa destruida" se debe, sobre todo en el cultivo crudo a la formación de metano que no se reportó.

H. Heukelekian, estudiando la descomposición dela celulosa contenida en lodos asentados y sin fijar su atención en la producción de gases sino solamente en la desintegración de la celulosa, efectuó fermentaciones en un medio con un pH de 5.2, notando un ascenso en el pH cuando ya toda la celulosa había desaparecido del medio debido a la descomposición, por fermentación, de los ácidos ya formados. Esto indica que las bacterias que toman parte en las primeras fases de la fermentación son ácido resistentes, en cambio las que producen metano son sensibles a la acidez. Concentra

ciones de 2000 a 6000 p.p. millón de ácidos orgánicos o sus sales, expresadas como ácido acético, inhiben completamente la formación de metano incrementándose notablemente la producción de anhidrido carbónico y apareciendo hdrógeno entre los gases formados. En investigaciones recientes se ha llegado a la conclusión que la regulación artificial del pH por medio de sales buffer no es conveniente.

Si la acidez impide la formación de metano y su neutralización por sustancias químicas no es aconsejable, la fermentación deberá llevarse en t al forma que la descomposición metánica de los ácidos producidos tenga la misma velocidad que su formación.

Esto se logra vigilando los factores ecológicos que se están estudiando, ya que cualquier alteración ánormal de ellos modifica invariablemente la acidez del medio.

Concentración de nitrógeno amoniacal.

Las fuentes más convenientes de nitrógeno amoniacal para esta fermentación son: $(NH_4)_2CO_3$, NH_4Cl y NH_4OH y de diversas experiencias se ha llegado a la conclusión que son indispensables 7 mgs de nitrógeno amoniacal por gm de celulosa o material celulósico.

Cuando el material utilizado en la fermentación o para inocular contiene nitrógeno en más de 0.7 % no es necesario agregar sal amoniacal alguna.

Los efectos de la insuficiencia de nitrógeno se ven en la siguiente tabla (Fermentaciones anaeróbicas.- A. M. Buswell y W. D. Hatfield; Illinois State Water Survey, Bull. 32; 130; 1941)

EFECTO DE LA CONCENTRACION DE NITROGENO AMONIACAL SOBRE LA VELOCIDAD DE "GASIFICACION"[a] DEL RASTROJO.

(Todas las demás variables que afectan estas fermentaciones se mantuvieron lo más constantes posible)
Fermentación efectuada durante un período de 18 días con un bajo contenido de nitrógeno amoniacal.

	Máximo	Mínimo	Promedio
Nitrógeno amoniacal; p.p. millón	28.0	4.2	15.1
Acidos volátiles como acético; p.p. millón	494.0	275.0	377.0
Gas por día, pies cúbicos	8.9	3.5	6.8

Fermentación efectuada durante un período de 51 días controlando el contenido de nitrógeno amoniacal.

	Máximo	Mínimo	Promedio
Nitrógeno amoniacal; p.p. millón	124	24	59
Acidos volátiles como acético; p.p. millón	364	95	228
Gas por día, pies cúbicos	68	24	34.2

([a]). Los autores denominan gasificación a todo el proceso fermentativo por el cual es convertida la celulosa en metano y anhídrido carbónico.

Influencia del rH.

Aun cuando algunas de las bacterias que toman parte en esta fermentación son anaeróbicas facultativas y estas son las que conducen el proceso fermentativo hasta la producción de ácidos orgánicos, las bacterias productoras de metano, propiamente dichas, es decir las que efectúan las últimas fases del proceso, son anaeróbicas estrictas y el rH necesario para su desarrollo, medido por Imshenetskii, es de 15 - 18 con un pH que variaba de 7.4 a 7.6 (Si se considera la fórmula de Nernst aplicada al electrodo de hidrógeno se tendrá:

$$E_H = -\frac{RT}{f}\log\frac{\sqrt{P}}{(H^+)} = -\frac{RT}{f}\log\frac{1}{(H^+)} + \frac{RT}{2f}\log\frac{1}{P}$$

$$E_H = -k\ pH + k'\ rH$$

de donde se deduce que el rH es función del pH y es necesario conocer éste para que aquel tenga valor).

Cuando en un recipiente dentro del cual se efectúa una fermentación anaeróbica de la celulosa se introduce aire, se producen grandes cantidades de CO_2 y H_2O debido a la oxidación biológica directa de la celulosa:

$$(C_6H_{10}O_5) + 6O_2 = 6CO_2 + 5H_2O$$

y también se encuentra en el medio gran cantidad de ácidos orgánicos.

Al iniciarse la fermentación es cuando se debe tener un mayor cuidado para evitar la presencia de aire pues provocando ésto la rápida formación de ácidos se crea un medio desfavorable a los microorganismos productores de metano y la flora bacteriana modifica su composición en perjuicio del rendimiento de gases combusti-

bles.

Casi siempre el material celulósico, cuando está constituido de deshechos vegetales lleva consigo grandes cantidades de aire que es necesario eliminar. Esto se logra remojando el material antes de utilizarlo para efectuar la alimentación.

Agitación.

Cuando el material que se va a fermentar es de naturaleza fibrosa, como residuos vegetales, estiércol, lodos de asentamiento de aguas negras, etc., se presenta un fenómeno que obstaculiza el desarrollo normal de la fermentación: Las bacterias, como se dijo antes, se acumulan en la superficie del material celulósico que les sirve de soporte y por lo tanto el desprendimiento de gases se efectúa precisamente en ese lugar. Los gases elevan a la superficie al material, acumulándolo en ella donde forma una costra que rápidamente se acidifica y además del obstáculo mecánico que constituye para el desprendimiento de los gases provoca la inhibición de las bacterias productoras de metano, lo que baja enormemente el rendimiento de gas combustible.

Se han diseñado numerosos dispositivos para evitar esto, como se ve en los trabajos de algunos investigadores como Mizuno, Rudolf Heisig, etc. Hasta ahora el único que ha dado resultados convenientes es el patentado por Buswell y Boruff y que fundamentalmente consta de un tanque cerrado dentro del cual gira un tambor formado con tela de alambre y que contiene el material celulósico en fermentación.

En la tabla siguiente se dan datos comparativos de resultados obtenidos con este dispositivo y los de otros investigadores:

DATOS COMPARATIVOS DE RENDIMIENTOS GASEOSOS.
(Dióxido de carbono y metano; experimentos globales)

Material	Fowler y Joshi[a] Tiempo Días	Rend. cc./gm.alim.	Omelianski. Tiempo Días	Rend. cc./gm.alim.	Buswell y Boruff[b] Tiempo Días	cc./gm.alim
Papel filtro	30	15	135	267	30	676
Papel periódico	30	25	---	---	30	300
Cáscaras y bástagos de plátano	30	41	---	---	30	360
Paja de lino	--	--	180	c	20	300
Trozos de lino	--	--	---	---	20	210
Paja de trigo	--	--	---	---	20	245
Rastrojo	--	--	---	---	20	275-375

(a).- Usaron grandes cantidades de cieno para inocular.
(b).- Usaron pequeñas cantidades de inoculación y los datos se corrigieron por el gas producido por un testigo llevado con la inoculación.
(c).- 22 a 31 % de pérdidas en peso. No dá datos sobre gas.

Cuando el material sometido a la fermentación es líquido, como en el caso de los desperdicios de las destilerías, se forma una gran cantidad de espuma que tiene el mismo efecto que la costra de que se habló anteriormente y se rompe circulando el mismo medio con una bomba cuya descarga forme una especie de lluvia sobre la superficie espumosa.

Velocidad de alimentación.

La velocidad de alimentación depende de dos factores fundamentales: Naturaleza del material alimentado y acidez del medio.

Se ha visto, como resultado de numerosas fermentaciones efectuadas con muy diversas sustancias que, supuestas condiciones uniformes en las fermentaciones de materiales diferentes, cada uno de ellos tiene una velocidad particular de alimentación más allá de la cual no se debe pasar pues se provocaría un aumento en la concentración de los ácidos, alterando las condiciones normales bajo las cuales se desarrolla la fermentación. Existen materiales que poseen además de la celulosa cantidades importantes de otras sustancias como otros polisacáridos, ácidos orgánicos, lignina, etc., que tienen ciertas particularidades frente a esta fermentación, como se encuentran en el caso de los polisacáridos diferentes a la celulosa, que muestran una tendencia muy marcada a producir rápidamente grandes cantidades de ácidos; en el de los ácidos orgánicos que deben ser alimentados con mucha precaución para evitar que su presencia modifique la flora bacteriana y en el caso de la lignina, de muy difícil fermentación, que baja el rendimiento de los gases producidos por unidad de tiempo.

Al hablar de la influencia de la acidez se dijo que el modo de combatirla es suspendiendo la alimentación o disminuyendo la velocidad a la cual la efectuamos, por lo que no tiene objeto extenderme sobre este tema.

Existe una relación entre la velocidad de alimentación y el rendimiento gaseoso y se puede decir en general, que entre menor es la velocidad de alimentación, mayor es el rendimiento gaseoso por gramo de material alimentado, pero la producción por li-

tro de capacidad del tanque utilizado para llevar a cabo la fermentación, disminuyo.

La velocidad que se ha encontrado conveniente en diversos experimentos efectuados con este fin es la de 1.25 gms por litro por día.

Influencia de la presión.

La actuación de la presión sobre el desarrollo de la fermentación tiene importancia desde el punto de vista del almacenamiento del gas producido, pues siendo sumamente ligero, sus depósitos resultan voluminosos aún a presiones pequeñas. Así, 100 gms de una mezcla de 52 % de metano y 48 % de anhídrido carbónico, ocupan en condiciones tipo, 97.216 lts; en cambio, a 35 libras por pulgada cuadrada de presión ocupan 40.8 lts o sea un poco menos de la mitad.

De los experimentos efectuados a diferentes presiones se ha llegado al conocimiento deque las pequeñas presiones, hasta 35 libras por pulgada cuadrada, no afectan seriamente la formación de gases pero las presiones muy elevadas impiden el desarrollo normal de la fermentación. Los datos siguientes están tomados de Anaerobic fermentations. Ill. State Water Survey Bull. 32; 102; 1941 y la tabla de Ibidem; 48.

DATOS REFERENTES A LOS GASES PRODUCIDOS EN LA FERMENTACION DE RASTROJO BAJO PRESION.
(25 - 30 °C; 35 libras por pulgada cuadrada de presión)

	Volumen total lts.	CO_2 lts.	CH_4 lts.	$\frac{CH_4}{CO_2}$	Peso de CO_2 y CH_4: gms
Gas obtenido a P. y T. tipos.	338	143	182	1.27	413
Gas corregido por el CO_2 disuelto.	363	168	182	1.08	462

Analisis:

CO_2 : 42.3%; H_2 : 0.7%; CH_4 : 53.7%; N_2 : 3.3%

$$\frac{\text{Peso de los gases formados}}{\text{Materia digerida}} = 1.11$$

TABLA DE DATOS DE LA

FERMENTACION DE DEXTROSA, SOMETIDA A UNA FUERTE PRESION.

Sustrato: Dextrosa, 6.0 gms.
Temperatura: 25 - 40 °C.
Presión: 10000 lbs por pulgada cuadrada.
Volumen del matraz de cultivo: 600 cc.
Duración: días, 60.
Inoculación: Asbesto y licor de una fermentación anterior.

		ml.	gms.
Volumen del gas producido		15.4	
CH_4	91.0%	14.0	
H_2	1.3%	0.18	
CO_2	7.8%	1.2	
CO_2 disuelto		20.0	
Peso del gas producido			0.05
Análisis del licor :			
pH	6.0		
Acido succínico		60 mg/lt	0.036
" propiónico		1665 mg/lt	1.000
" láctico		3000 mg/lt	1.801
" acético		880 mg/lt	0.53
Dextrosa		378 mg/lt	0.63
Protoplasma(estimado)	10%		

Las consideraciones que se han hecho acerca de los factores fundamentales que afectan la fermentación anaeróbica de la celulosa, conducen a la afirmación de que el factor más importante es la acidez del medio. Todos los demás factores son mediatos, pues invariablemente provocan una alteración en la acidez que es la causa inmediata del desarrollo normal o anormal de la fermentación.

II

FERMENTACION DE RESIDUOS VEGETALES CELULOSICOS.

Los experimentos preliminares con residuos vegetales fueron hechos en pequeña escala y debido a ello no pudieron satisfacerse condiciones indispensables para obtener rendimientos industriales Efectuados en frascos de pequeña capacidad (de 1 a 25 lts), no fué posible alimentarlos continua o intermitentemente, sino que todo el material fué añadido al iniciarse la fermentación; no hubo control sobre el pH, el contenido de nitrógeno, la concentración de ácidos volátiles, etc., ni se agitó el medio.

Se utilizaron materiales muy diversos con el objeto de ver si en general todos los desperdicios vegetales son susceptibles de ser empleados con éxito pues cada uno de ellos tiene características propias debidas a su composición y los resultados obtenidos en estas pruebas están resumidos en la tabla siguiente en la cual la cantidad excesiva de días empleados en la fermentación de una cantidad tan exigua de material es un indicio de las malas condiciones en que se efectuó la digestión (Fermentaciones anaeróbicas.- Ill. State Water Survey Bull. 32; 95; 1941).

FERMENTACION ANAEROBICA DE DESPERDICIOS VEGETALES.

22 - 28 °C.

Material	Peso (Base seca)	Tiempo Días.	Datos del gas en condiciones tipo. (Corregido por inoculación) Vol. cc.	Peso gms.	Relación CO_2:CH_4
Rastrojo	10	67	4243	5.52	1:1.14
Cáscaras de cacahuate	10	62	982	1.20	1:1.51
Popotes	10	62	3852	4.50	1:1.37
Olotes	10	62	4254	5.13	1:1.25
Paja de trigo	10	62	3422	3.85	1:1.38
Alfalfa	10	62	3266	3.78	1:1.35
Cola de gato	10	62	1297	1.25	1:1.55
Tabaco	10	62	208	0.30	1:0.38
Tabaco desvenado	10	62	1220	1.46	1:1.44
Papel de periódico	10	62	2724	3.25	1:1.27
Bástago de plátano	10	62	3739	4.30	1:1.63
Hojas mezcladas	10	62	2939	3.40	1:1.46
Virutas largas	10	62	2732	3.39	1:1.19
Desperdicios de máquina trilladora	10	62	6151	6.83	1:1.6
Virutas tratadas en autoclave	10	62	2526	2.95	1:1.17
Bagazo	10	62	3260	3.98	1:1.08
Ramas de pino	10	63	375'	0.41'	1:2.18
Ramas de pino tratadas con Álcali	10	63	1078'	1.35'	1:1.31
Maiz de Tejas	10	63	5330'	5.55'	1:2.8
Carbón bituminoso	10	131	1131'	1.76'	1:3.7
Tallos de maiz picados	10	62	1948	2.26	1:1.24
Desperdicios de lino	10	62	2405	2.94	1:1.33
Paja de lino	10	62	3500	4.48	1:1.44
Corteza de arroz	10	32	475	0.52	1:1.62
Astillas curtientes	10	32	575	0.65	1:1.65

(').- No corregido por el anhidrido carbónico disuelto.

Dadas las condiciones en que se efectuaron estas pruebas, sus resultados son excelentes y exceptuando algunos residuos que presentan algunas dificultades en su fermentación, podemos decir que ésta es factible en los residuos vegetales en general.

Los resultados obtenidos en las pruebas preliminares indujeron a los investigadores que reportaron los datos anteriores a realizar experimentos en una planta piloto.

El tanque utilizado en la planta piloto construida y operada

en los laboratorios de la State Water Survey de Urbana Illinois, E.E.U.U., era de forma rectangular, tenía una mampara vertical que lo dividía en dos compartimientos: Uno grande de fermentación y uno pequeño de eliminación de residuos. En el compartimiento grande se encontraba un tambor cilíndrico cuya pared estaba construida con tela de alambre, montado sobre una flecha que se apoyaba en la mampara y en la pared opuesta a ella y que le transmitía un movimiento lento rotatorio y dentro del cual iba el material en fermentación. La alimentación se hacía por uno de los extremos del tambor y debido a cierta inclinación el material avanzaba hacia el otro extremo de donde pasaba al compartimiento de residuos el material que no había fermentado. Los resultados que obtuvieron se dan en la tabla cuyo título es "Planta piloto".

El residuo que queda de los materiales fermentados está constituido en general por las parte leñosas de ellos como son los nodos, los haces vasculares y la corteza, todos ricos en lignina.

Una de las sustancias que ha sido motivo frecuente de dificultades en esta fermentación, es la lignina. Fischer y Schrader formularon una teoría según la cual, la fermentación anaeróbica transforma a la lignina en sustancias úlmicas que a su vez son procursoras del carbó de piedra.

Waksman y Stevens, a su vez, dicen que no existen organismos anaeróbicos específicos que ataquen la lignina y que por lo tanto en fermentaciones anaeróbicas, apenas si son descompuestas trazas de lignina y en condiciones aeróbicas la descomposición llega a ser total aunque se efectúa muy lentamente.

Bajo la dirección de Boruff se hicieron experimentos con lignina pura obtenida de rastrojo. Se inoculó con líquidos provenientes de cultivos mezclados de bacterias productoras de metano

PLANTA PILOTO

25 - 30 °C

Material alimentado.	Rastrojo seco.	Rastrojo verde	Rastrojo verde mezclado con paja.	Paja de trigo	Paja de trigo y sucro
Tiempo de operación: días	303	31	30	121	93
Peso del material alimentado seco, lbs	5464.2	700.1	787.8	2624.2	2726.7
Peso promedio del material alimentado, seco, por día: lbs	18.0	22.6	26.3	21.6	29.4
Gas recuperado:					
Volumen total: pies cúbicos	22707.0	1600.0	2030.0	6635.0	7040.0
Peso total: lbs	1736.0	132.0	173.0	545.0	583.0
Contenido promedio de metano:%	52.0	47.0	47.0	50.0	50.0
Volumen promedio por día: pies cúbicos	75.0	52.0	68.0	55.0	76.0
Pies cúbicos por ton. de material alimentado	8300.0	4570.0	5150.0	5070.0	5150.0
Pies cúbicos de gas por pié cúbico de tanque por día.	0.41	0.28	0.37	0.30	0.41
Residuos extraidos. Base seca.					
Peso: lbs	3179.7	509.8	352.7	1821.3	2158.4
Nitrógeno amoniacal: %	0.1	0.1	0.1	0.1	0.06
Nitrógeno total promedio	1.2	1.2	1.2	1.2	1.0
Nitrógeno total: lbs	38.2	6.1	4.3	21.8	21.6
Licor extraído:					
Volumen: galones	2250.0	0.0	350.0	0.0	1380.0
Sólidos totales: lbs	190.0	0.0	29.0	0.0	112.0
Nitrógeno amoniacal: lbs	3.23	0.0	2.01	0.0	4.40
Nitrógeno total: lbs	8.31	0.0	1.09	0.0	1.52
Residuos de aguas negras añadidos como Inoculación:					
Volumen: galones	0.0	0.0	0.0	105.0	130.0
Sólidos totales: lbs	0.0	0.0	0.0	52.0	65.0
Nitrógeno total: lbs	0.0	0.0	0.0	1.72	2.29
Nitrógeno añadido como NH_4Cl:lbs	4.65	0.92	2.33	3.10	1.15
Nitrógeno total en el material añadido:lbs	39.84	5.15	6.70	21.37	23.13

y se obtuvieron los siguientes resultados:

		33 días.		
Lignina	gms	5	5	3
Metano	cc.	133	368	140
CO_2	cc.	43	---	6

En los datos referentes al anhidrido carbónico no se consideró aquel que se encontraba disuelto en el líquido madre.

Con el objeto de ver su acción sobre cultivos activos, se preparó uno con glucosa y cuando la fermentación había llegado a su máximo de actividad se agregaron 5 gms de lignina; la fermentación se detuvo y no se pudo iniciar de nuevo con adiciones subsecuentes de glucosa, lo que hace suponer que la lignina pura tiene propiedades bacteriostáticas con respecto a esta fermentación.

La lignina al estado natural tiene un comportamiento diferente y los mismos investigadores reportaron los datos que se dan en la página siguiente obtenidos de una fermentación efectuada sobre rastrojo y en la cual se controló la lignina alimentada y la descompuesta.

Los desechos de esta fermentación se pueden convertir en excelente abono, dejándolos amontonados durante algún tiempo y humedeciéndolos con sulfato de amonio. Debido a que las partes más fermentescibles ya se eliminaron durante el proceso, no existe el peligro de que al continuar fermentando se formen ácidos orgánicos que acidifiquen las tierras y habiendo sido estabilizados por la misma fermentación no desprenden mal olor.

PESOS TOTALES DE MATERIALES AÑADIDOS Y OBTENIDOS EN

LA FERMENTACION DEL RASTROJO A 25 - 30 °C

			Residuos retirados				Fermentado.			
	Rastrojo agregado	Total añadido.	Después de 136 días		Después de 600 días		En 136 días		En 600 días	
	gms.	gms.	Rastrojo.	Total	Rastrojo.	Total	Total	%	Total	%
Sólidos totales	60.0	69.0	26.11	39.0	21.4	30.5	30.0	44	38.5	56
Materia volátil total	57.6	63.2	25.67	33.4	18.7	23.7	29.8	47	39.5	63
Cenizas	2.40	5.8	0.44	5.6	2.7	6.8	0.2	3	1.0	17
Soluble en agua	3.65	12.6	0.74	9.7	1.8	10.9	2.9	23	1.7	14
Soluble en éter	1.39	1.4	0.17	- -	0.2	- -	- -	--	- -	--
Soluble en alcohol etílico - benzeno	3.92	3.9	1.74	- -	- -	- -	- -	--	- -	--
Pentosanas, total	12.66	12.7	5.93	5.9	3.7	3.7	6.8	54	9.0	71
Celulosa	22.32	22.3	9.61	9.6	3.4	3.4	12.7	57	18.9	85
LIGNINA	15.06	15.1	3.75	8.8	7.1	7.1	6.3	42	8.0	54
Proteínas	1.43	3.9	1.22	- -	2.7	- -	- -	--	- -	--

III

GASES PRODUCIDOS. ANALISIS. PODER CALORIFICO.

Los gases que se forman en esta fermentación están constituídos esencialmente por metano y anhidrido carbónico. Su composición está determinada por el control más o menos estricto de los factores ecológicos y la presencia de gases diferentes a los mencionados es un indicio de que la fermentación no se efectúa normalmente.

Cuando la fermentación tiene lugar de modo discontinuo, la composición de los gases varía con el tiempo, obedeciendo esta variación a las diferentes etapas que constituyen el desarrollo de la fermentación. Así, en un principio, es muy rápida la formación de ácidos y el anhidrido carbónico predomina en los productos gaseosos; a medida que transcurre el tiempo, va aumentando la producción de metano hasta alcanzar el porcentaje teórico que le corresponde a la sustancia en fermentación, de acuerdo con la fórmula que se estableció ya. Según esta fórmula, cada sustancia produce gases de análisis cuantitativo característico y se pueden seguir las variaciones en la composición del medio, analizando a intervalos los gases que se desprenden, cuyo análisis refleja las alteraciones en la composición que están teniendo lugar en el transcurso de la fermentación.

Por ejemplo, la relación entre el óxido de carbono y el metano producidos en la fermentación del ácido fórmico es 3:1,

$$4H\text{-}COOH = 3CO_2 + CH_4 + 2H_2O$$

Para el ácido acético es 1:1;

$$CH_3\text{-}COOH = CO_2 + CH_4$$

Para el butírico es 3:5

$$2H_7C_3COOH + 2H_2O = 3CO_2 + 5CH_4$$

etc.

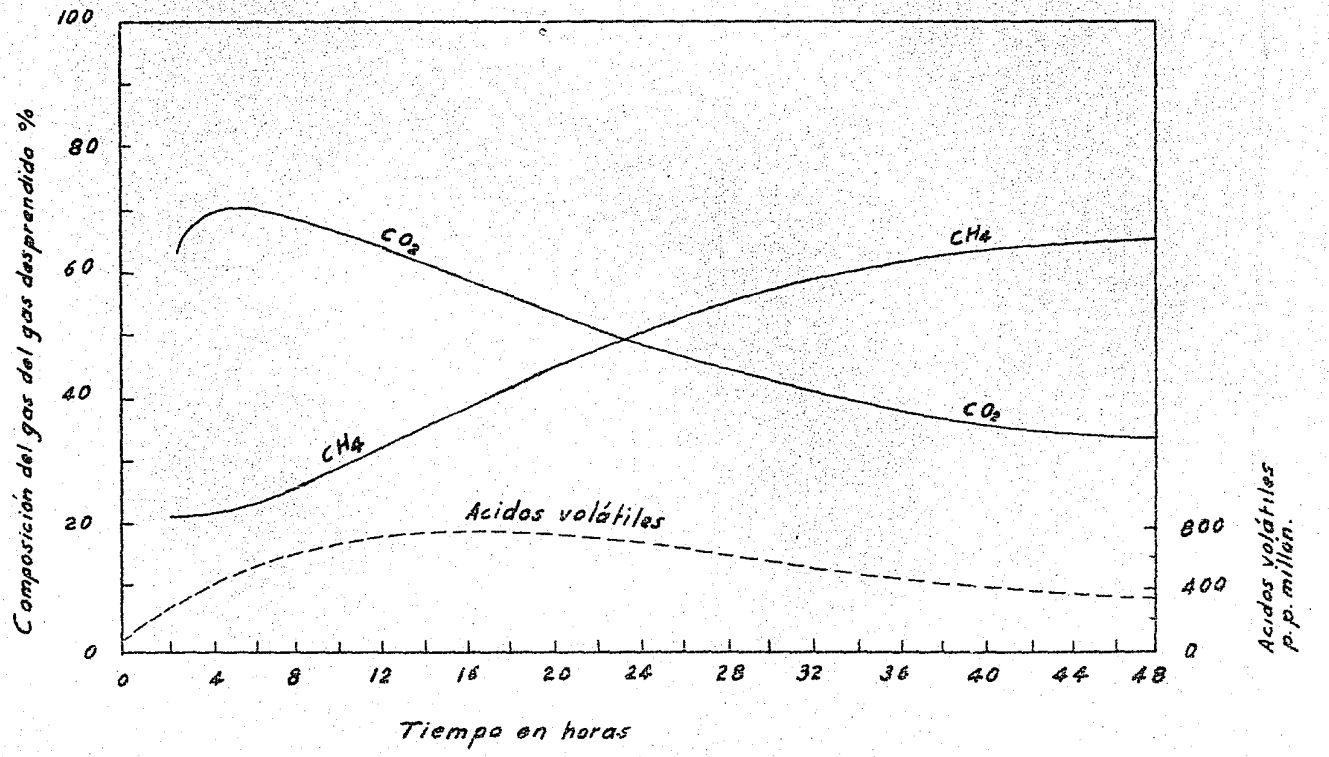
En los experimentos que se hicieron fermentando la dextrosa (The methane fermentation of organic acids and carbohydrates; D. Tarvin and A. M. Buswell; J. Am. Chem. Soc. ; 56; 1751; 1934.) se analizaron periódicamente los gases formados durante la fermentación y los resultados de estos análisis se encuentran en la gráfica anexa. Es muy probable que en la fase inicial haya habido la formación de ácido butírico que posteriormente se descompuso en la fase final, de acuerdo con las reacciones siguientes:

$$2C_6H_{12}O_6 = 2C_3H_7COOH + 3CO_2 + CH_4 + 2H_2O$$

$$2C_3H_7COOH + 2H_2O = 3CO_2 + 5CH_4$$

$$2C_6H_{12}O_6 = 6CO_2 + 6CH_4$$

Esta interpretación se basa en el hecho de que las relaciones de los gases formados obedecen a las dos primeras reacciones, sobre todo a las seis y treinta y seis horas respectivamente. El período intermedio debe corresponder al cambio progresivo de la reacción predominante en el proceso, es decir a la transición


FERMENTACION DE DEXTROSA
Composición del gas del gas desprendido %
100
80
60
40
20
0
CO_2
CH_4
CO_2
CH_4
Acidos volátiles
800
400
0
Acidos volátiles p.p. millón.
0
4
8
12
16
20
24
28
32
36
40
44
48
Tiempo en horas

gradual de la reacción que causa la formación de ácido butírico a la de su descomposición. Junto con esta transición se efectúan algunas reacciones parciales diferentes.

En las fermentaciones continuas no se han observado variaciones notables en el análisis de los gases con excepción del principio de la fermentación en que el anhidrido carbónico predomina por algún tiempo.

De los resultados de numerosos análisis hechos a los gases obtenidos en este proceso, reportados por diferentes investigadores se puede afirmar que el porcentaje de metano varía de 50 a 60 y se puede tomar como promedio, 55.

Suponiendo este análisis, se puede calcular el poder calorífico del gas:

Análisis, base seca:

CO_2 : 45%

CH_4 : 55%

$CH_4(g) + 2O_2(g) = CO_2(g) + H_2O(l)$; (Presión: 29.922 pulg de mercurio; 20 °C; $\Delta H = -210.8$ Cal por mol)

Si se supone que el gas se encuentra saturado con vapor de agua: Tensión de vapor del agua a 20 °C : 0.4858 pulg. de mercurio

$$29.922 - 0.4858 = 29.4362$$

$$1000 \frac{29.4362}{29.922} \times \frac{273}{293} = 919 \text{ lts.}$$

$$919 \times 0.55 = 505.45$$

$$\frac{505.45 \times 210.8}{22.4} = 4740 \text{ Cal por metro cúbico.}$$

IV

INSTALACION INDUSTRIAL.

En los ingenios azucareros existe el grave problema del consumo de combustible ya que representa un gasto muy fuerte en la elaboración del azúcar y en numerosos casos la dificultad para el transporte y almacenamiento de petróleo ha paralisado la zafra con las enormes pérdidas consiguientes.

De acuerdo con Webre (Evaporation; A. L. Webre; The Chemical Catalog Co. Inc.; 244 - 292; 1926), en un ingenio azucarero, cuando tiene determinado equipo y trabaja en ciertas condiciones, el bagazo producido durante la molienda excede las necesidades de combustible de la fábrica. Sin embargo, debido a la intermitencia de la molienda, siempre es necesario consumir otro combustible, sobre todo cuando se hace la limpieza del ingenio. El presente proyecto de instalación tiene por objeto analizar si existe alguna ventaja económica al convertir el excedente de bagazo en gases combustibles que se almacenarán para ser utilizados cuando por alguna causa se vea interrumpida la molienda.

Las condiciones en que debe trabajar un ingenio para que el bagazo producido lo sea en mayor cantidad que la necesaria para satisfacer las necesidades de combustible son las siguientes:

Fibra % de caña : 10.

Bagazo % de caña : 21.1.

Extracción de guarapo % de caña: 100.

Humedad % de bagazo: 48.

Temperatura del guarapo crudo: 100 °F.

Temperatura del guarapo claro: 205 °F (a la entrada del preevaporador.

Evaporación: 75%. (Utilizar un sistema de evaporación que consista fundamentalmente de un preevaporador operado con vapor de escape y cuyos vapores se empleen en calentar el jugo y en evaporarlo utilizando un cuádruple efecto).

Vapor de escape a 5 #.

Para una molienda de 100000 lbs por hora la potencia consumida en el ingenio es de 1500 HP (3820000 BTU, 3940 lbs de vapor de y a 212 °F).

Supuestas estas condiones, Webre hace el siguiente balance térmico:

	Lbs. de vapor de y a 212 °F.
Potencia	3940
Calentamiento	0
Quíntuple efecto calentando el jugo completamente hasta 210 °F	26350
Tachos	20000
Pérdidas por radiación	2500
Total	52790
Suministrado por el bagazo	54000
Excedente de bagazo	1210

La evaporación producida de y a 212 °F por una libra de bagazo en las condiciones anteriores es 2.56 lbs, por lo que el exce-

dente de bagazo es: 1210/2.56 = 472.656 lbs de bagazo por hora o sean 11344 lbs de bagazo por día, o sean 5.145 tons por día.

EQUIPO.

El contenido de sólidos en el bagazo es de 52%, por lo que será necesario fermentar 5.145 x 0.52 = 2.675 tons de sólidos por día. La relación de sólidos a volumen de tanques de fermentación es de 1:1000 por lo que se necesitarán 2675 m^3 de capacidad en los tanques de fermentación más un 7 % debido al aumento que causan los gases entrampados por los sólidos. En estas condiciones se deben disponer tanques que, entre todos, tengan una capacidad de 2875 m^3. Se logrará tener esta capacidad de tanques de fermentación con tres, cilíndricos, horizontales, de 18m de largo por 8.25 m de diámetro. Se construirán con lámina de 5/16" y obedecerá su construcción al diseño adjunto. Estarán dotados de una entrada de vapor con el objeto de impedir que la temperatura, en ciertas épocas del año, baje más allá de 30 °C. Con el objeto de controlar la temperatura cada uno llevará termómetro registrador. Se les hará, al frente, un registro por el cual pueda hacerse la limpieza y el cambio de la tela de alambre del tambor interior.

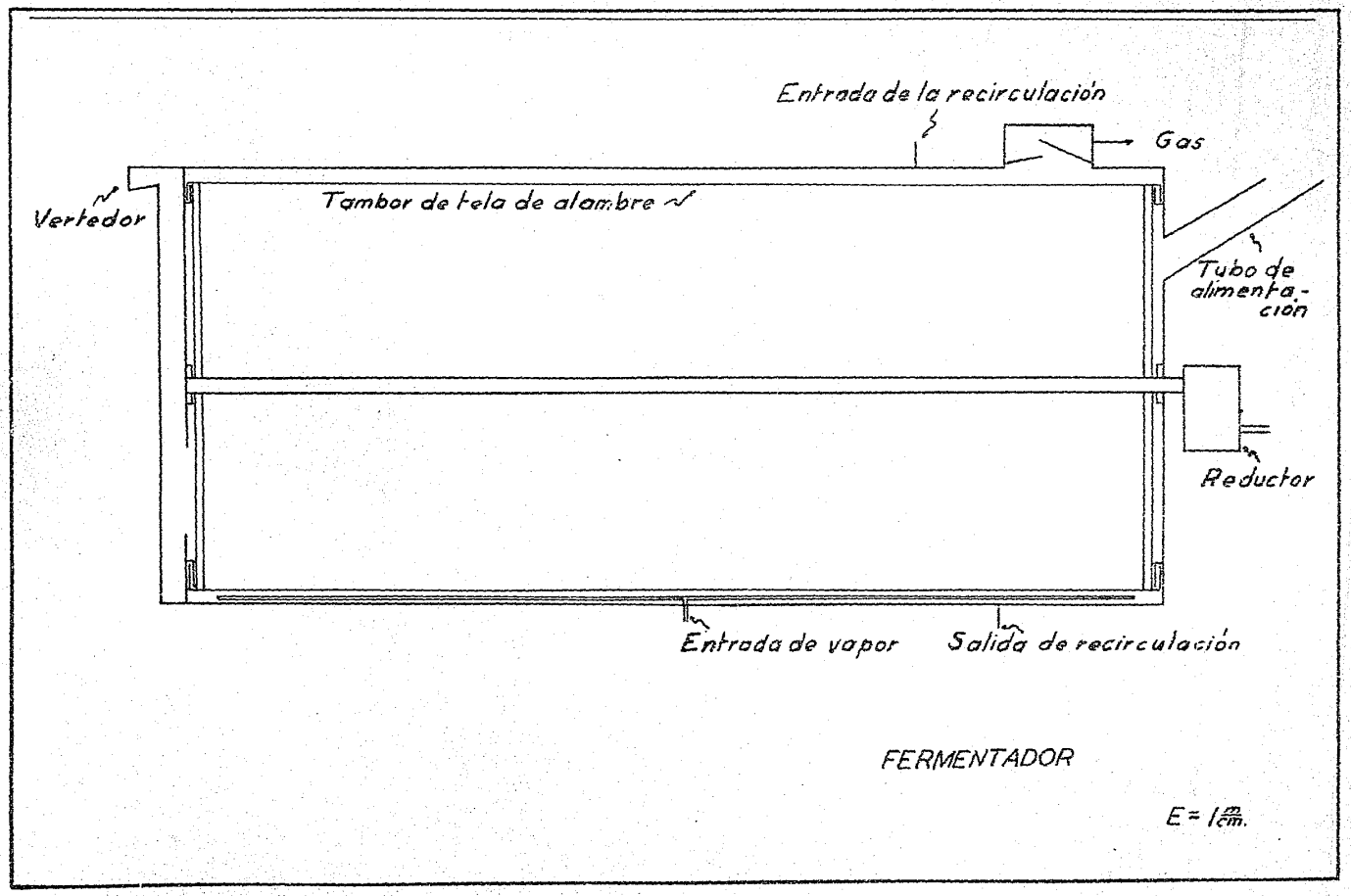
El tambor interior girará con una velocidad de 4 r.p.m. El motor que lo mueva deberá ser de 1 HP y 1750 r.p.m. acoplado a un reductor de las características siguientes:

"Reductor Link - Belt, HWB-70 Helical Worm Reduction Unit, Relation 438. Torque output 13650 inch-pounds".

Gusano conductor del bagazo:

Los trozos de bagazo son menores de 1".

Su densidad es aproximadamente de 40 lbs por pié cubico.


Entrada de la recirculación
Gas
Vertedor
Tambor de tela de alambre
Tubo de alimenta-ción
Reductor
Entrada de vapor
Salida de recirculación
FERMENTADOR
E = 1 m/cm.

El volumen de bagazo por hora será de:

$$\frac{5145}{0.454x40x24} = 11.9 \text{ pies cúbicos por hora.}$$

En el Catálogo de la Link-Belt No. 800 se vé que la velocidad del gusano puede ser de 5 r.p.m. y su diámetro de 9".

$$HP = \frac{ALN + CWLF}{1000000} = \frac{54x90x5 + 12x40x90x1}{1000000} = 0.07$$

en donde:

A: Factor para el tamaño del gusano = 54

B: Longitud en pies =

N: Velocidad del gusano en r.p.m. = 5

C: Cantidad de material transportado por hora = 12 pies^3/hr.

W: Peso del material transportado en lbs por pie cúbico = 40

F: Factor para la clase de material = 1.

Considerando un factor de servicio de 1.25,

$$HP = 0.07x1.25 = 0.09$$

Con lo anterior se encuentra en el catálogo citado que el reductor más conveniente es el siguiente:

Reductor Link-Belt No. WB-30; relación de reducción: 57.

Se utilizará un motor de 1/8 HP y 300 r.p.m.

Bomba de recirculación.

Para la recirculación se utilizará tubería de 3" st. Se supondrá que un tanque se recircula totalmente en 24 horas y se considerará el caso, para el cálculo de la bomba, que uno de los tanques se vacía en otro de ellos.

Por el teoroma de Bernoulli,

$$W = x_2 - x_1 + \frac{U^2}{2g} + F$$

$x_1 = 0$

$x_2 = 27.1$ pies

$$\text{Gasto} = \frac{958333 \times 0.03531}{24 \times 3600} = 0.391 \text{ pies}^3 \text{ por seg.}$$

El tubo de 3"st. tiene 3.068" de diámetro interior y una área transversal de 7.393 pulgadas cuadradas.

$$U = \frac{0.391 \times 144}{7.393} = 7.63 \text{ pies por seg.}$$

$2g = 64.3$ pies por segundo por segundo.

$\frac{U^2}{2g} = 0.904$ pies libra por libra.

Debido a la gran dilución de los sólidos en el líquido (menos de un gramo por litro) se puede considerar que se recircula agua a 30 °C.

$$\frac{DU\rho}{\mu} = \frac{3.068 \times 7.63 \times 62.4}{12 \times 0.000672 \times 0.8} = 226000 \quad \text{(flujo turbulento)}$$

$$F = \frac{4fNU^2}{2gD}$$

$f = 0.0048$

$N = 87.2$ pies + 5 codos de 90° + 1 te + 3 válvulas de compuerta = 115.2 pies.

$$F = \frac{4 \times 0.0048 \times 115.2 \times 7.63^2 \times 12}{64.3 \times 3.068} = 7.85$$

$W = 27.1 + 0.904 + 7.85 = 35.85$ pies libra por libra

Suponiendo una eficiencia en la bomba de 60,

$$HP = \frac{35.85 \times 0.391 \times 62.4}{550 \times 0.6} = 2.65$$

Capacidad de la bomba: $0.391 \times 60 \times 7.481 = 175$ Gal por minuto.

Se utilizará una bomba Worthington, tamaño y tipo 2-CF-1, movida por un motor de 3 HP y 1750 r.p.m.

Compresora para el gas:

De los datos dados por Buswell y Hatfield en la tabla ya incluida en este trabajo, se puede deducir la cantidad de gas producido:

1036.767 Kgs de sólidos produjeron 643.062 m^3 de gas; si se supone que sea digerido el 50 % del bagazo alimentado, 1338 Kgs producirán 830 m^3 de gas por día ó 34583 lts/hr ó 1221 $pies^3$/hr en condiciones tipo.

Como la pérdida de presión por fricción del gas desde los tanques hasta la compresora es pequeña, se puede aplicar la fórmula de Molesworth (Piping Handbook; J. H. Walker and S. Crocker McGraw Hill Book Co. Inc.; 142; 1939). Con esta fórmula y por aproximaciones se obtiene un gasto en la succión de la compresora de 1460 $pies^3$ por hora en condiciones de presión y temperatura que se suponen de 13.614 $lbs/pulg^2$ y 30 °C, respectivamente.

$$h = \frac{Q^2 s l}{1000\ d^5} = \frac{1460^2 x 1023 x 112}{1000 x 6.065^5} = 29.74 \text{ pulgadas de agua.}$$

$$= 1.074 \text{ lbs/pulg}^2$$

En donde:

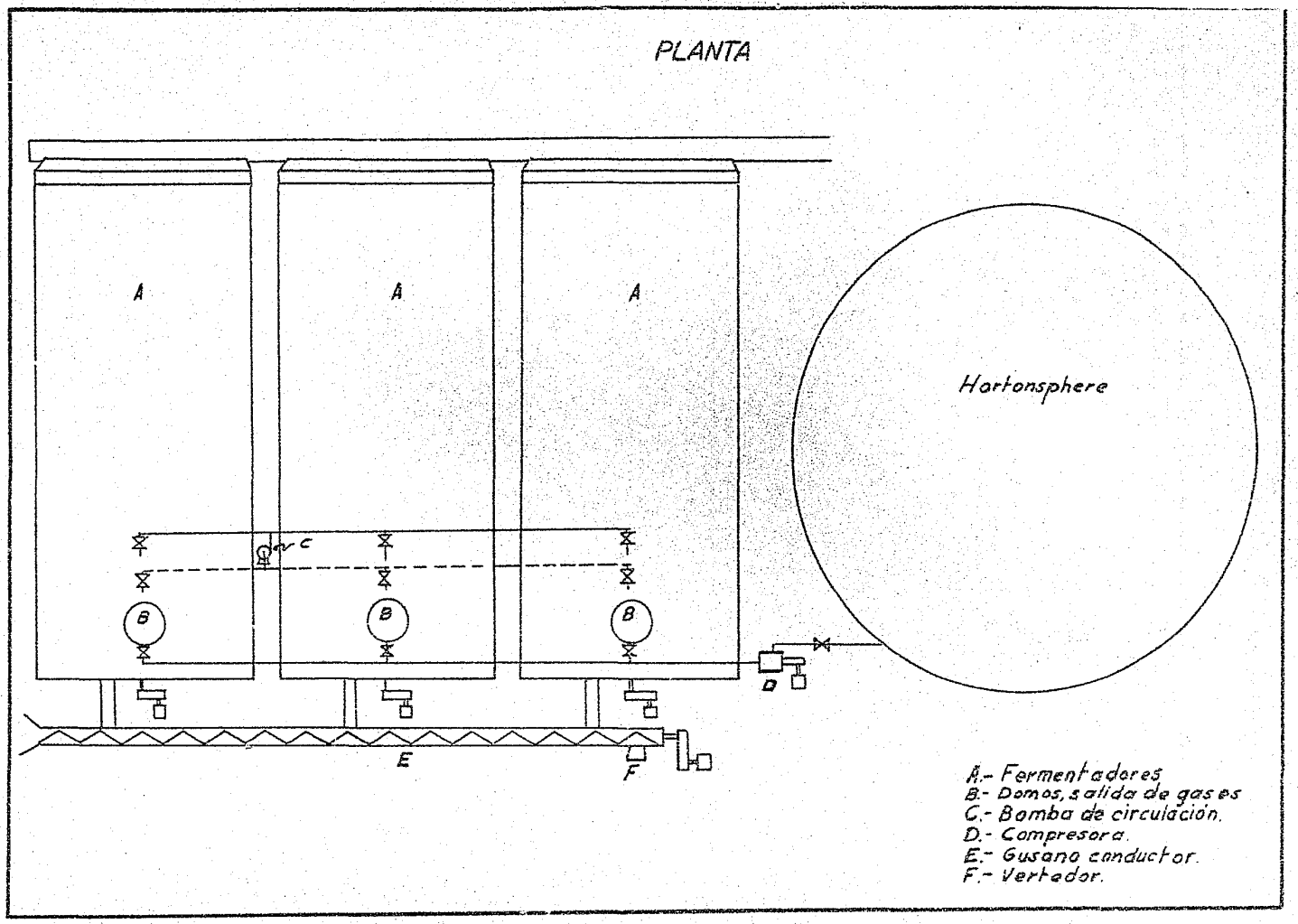
Q: Piés cúbicos por hora = 1460

d: Diámetro de la tubería en pulgadas = 6.065

s: Densidad relativa al aire = 1.023

l: Longitud equivalente en yardas = 24 yardas + 4 válvula + 3 TEs + 2 codos de 90° = 112 yardas.

El valor obtenido es muy aproximado al supuesto ya que considerando que el gas al salir de los tanques está a una presión de 14.7 $lbs/pulg^2$, tenemos que: 14.7 - 1.074 = 13.626


PLANTA
A
A
A
Hortonsphere
C
B
B
B
D
E
F
A.- Fermentadores
B.- Domos, salida de gases
C.- Bomba de circulación.
D.- Compresora.
E.- Gusano conductor.
F.- Vertedor.

CONSIDERACIONES ECONOMICAS.

Equipo:	Precio por unidad.		
Fermentadores: 3 tanques de lámina de 5/16", cilíndricos de 18 m de largo por 8.25 de diam. con accesorios	$12000.00	$36000.00	
Cimentación:		5000.00	$41000.00
Bomba centrífuga de 175 Gal por min. válvulas y tubería			450.00
Gusano conductor de bagazo			750.00
Tubería y válvulas para gas con dispositivos de seguridad			1200.00
Reguladores para gas y medidores.			2500.00
Compresora			450.00
Hortonsphere		40000.00	
Cimentación		2000.00	42000.00
			88350.00
Dirección técnica, patentes, imprevistos, etc.			20000.00
			$108350.00

Costos de operación (180 días al año)

Cargas fijas (Costo de capital etc.) 6%		$ 36.127
Depreciación:		
Tanques, 5%	$11.39	
Bomba centrífuga, 6.5%	0.162	
Gusano conductor de bagazo, 8.5%	0.354	
Válvulas y tubería para gas etc.5%	0.333	
Reguladores para gas, etc., 5%	0.556	
Compresora, 8%	0.200	
Hortonsphere, 4%	9.333	22.328
Mano de obra: 2 peones	10.00	20.000
Mantenimiento, 2% de 88350.00		9.817
Cargas por servicio: Se consumen 10.25 HP que equivalen a		
A la vuelta:		$ 88.262

de la vuelta $ 88.262

155952 Cal y suponiendo una eficiencia térmica total de 15, su conversión a energía eléctrica será:
155952/0.15 = 1039680 Cal que se deducirán del poder calorífico de los gases producidos diariamente.

$ 88.262

Resumen:

Costos diarios:

Capital	$ 36.117
Depreciación	22.328
Mano de obra	20.000
Mantenimiento	9.817
	$ 88.262

(No se incluye la supervisión de la operación porque ésta será hecha por el laboratorio del mismo Ingenio)

Se producen diariamente:

830 x 4740 - 1039680 = 2894520 Cal con un costo de

$ 88.262.

Costo de una Cal: $0.0000305

1 Litro de petróleo con un poder calorífico de 9282.9 Cal tiene un costo total de $ 0.0362.

Costo de una Cal proveniente de petróleo: $0.0000038

Diferencia: $0.0000267

CONCLUSIONES.

El anterior proceso no tiene ventajas económicas aplicándolo en la forma descrita pero existe la posibilidad de que lo sea en el caso que los residuos de la fermentación se empleen en la fabricación del papel, pues la pulpa celulósica que es la que impide obtener una calidad de papel aceptable en el mercado se elimina totalmente en este proceso y solamente quedan, en los residuos, fibras celulósicas de cierta longitud y las partes del bagazo impregnadas de lignina. Además, produciendo el gas para el consumo inmediato, se elimina la necesidad de utilizar una Hortonsphere que representa una inversión muy fuerte.

BIBLIOGRAFIA.

Boruff C. S. y A. M Buswell.- Productos de la fermentación de la celulosa.- Ind. and Eng. Chem.; 21; 1181; 1929.

Boruff C. S. y A. M. Buswell.- Productos de la fermentación del rastrojo.- Ind. and Eng. Chem.; 22; 931; 1930

Buswell A. M.- Producción de gases combustibles por fermentaciones anaeróbicas.- Ind. and Eng. Chem.; 22; 1168; 1930.

Buswell A. M. y C. S. Boruff.- Equipo mecánico para la fermentación de materiales fibrosos.- Ind. and Eng. Chem.; 25; 147; 1933.

Buswell A. M. y W.D. Hatfield.- Fermentaciones anaeróbicas.- Illinois State Water Survey Bull. 32; 11; 1941.

Duclaux E.- Traité de Microbiologie; III; IV; Masson et Cie. Editeurs. 1898.

Déribéré M. Les Aplications Industrielles du pH le potentiel d'oxydo-reduction.- Dunod; 1937.

Engineering Dept. Pacific Flush Tank Co.- Eliminación de los peligros del gas en las plantas de tratamiento de aguas negras Water Works & Sewerage; 88; 423; 1943.

Furman R. E. - Utilización del gas resultante del tratamiento de aguas negras.- Sewage Works J.; 12; 1087; 1940

Houkelokian H.- Descomposición de la celulosa de los sólidos en los lodos de asentamiento recientes.- Ind. and Eng. Chem.; 19; 928; 1927.

Heukelekian H. y B. Heinemann.- Estudios acerca de las bacterias productoras de metano, IV.- Desarrollo de los organismos productores de metano en los residuos sobrenadantes en el líquido de las aguas negras.- Sewage Works J. 11; 965; 1939.

Hodgman D.- Handbook of Chemistry and Physics.- Chemical Rubber Publishing Co.; 1936

Imshenetskii A. A. - Microbiología de la descomposición anaeróbica de la celulosa.- Microbiology; U. R. S. S. 8; 129; 1939.

Imshenetskii A. A. - La fermentación de la celulosa como un proceso simbiótico.- Ibidem 657.

Kimbal D. S. - Economía Industrial.- Fondo de Cultura Económica.- 1942.

Kimball D. S. y D. S. Kimball hijo.- Principios de Organización Industrial.- Buenos Aires.- 1942.

Lamirand J. et H. Parisello.- Cours de Chimie; III; Masson et Cie. Editeurs; 1932.

Link - Belt.- General Catalog 800.

Marks L. S.- Mechanical Engineers' Handbook.- McGraw Hill Book Co. Inc. 1941.

Neave S. L. y A. M. Buswell.- La oxidación anaeróbica de los ácidos grasos.- J. Am. Chem. Soc. 52; 3308; 1930.

Nelson G. H., R. P. Straka y M. Levine.- Descomposición del rastrojo con producción de gases bajo condiciones anaeróbicas a 28 - 30 °C.- Iowa State Coll. J. Sci.; 13; 161; 1939.

Pacific Coast Gas Association, San Fco. Cal. The. - Gas engineers Handbook. McGraw Hill Book Co. Inc. 1934.

Perry J. H. Chemical Engineers' Handbook.- MacGraw Hill Book Co. Inc. 1941.

Prescott S. C. and C. G. Dunn.- Industrial Microbiology.- MaGraw Hill Book Co. Inc. 1940.

Rahn Otto.- Physiology of Bacteria.- P. Blakistons Son & Co. Inc. 1939.

Scott S. W., E. B. Fred y W. H. Peterson.- Productos de la for-

montación termofílica de la celulosa.- Ind. and Emg. Chem. 22; 731; 1939

Stephenson Marjorie.- Bacterial Methabolism.- Longmans Green and Co.- 1939.

Symons G. E. y A. M. Buswell.- La fermentación metánica de los carbohidratos.- J. Am. Chem. Soc. 55; 2028; 1933.

Spencer G. L. y G. P. Meade.- Manual de Fabricantes de Azúcar de Caña y Químicos Azucareros.- John Wiley & Sons Inc.; 1932.

Tarvin G. L. y A. M. Buswell.- La fermentación metánica de ácidos orgánicos y carbohidratos.; J. Am. Chem. Soc. 56; 1751; 1934.

Tyler Ch.- Chemical Engineering Economics.- McGraw Hill Book Co. Inc. - 1938.

Walker J. H. and S. G. Crocker.- Piping Handbook.- McGraw Hill Book Co. Inc. 1939.

Walker W. H., W. K. Lewis, W. H. Mc Adams and E. R. Gilliland. - Principles of Chemical Engineering. McGraw Hill Book Co. Inc. 1937.

Waksman S. A. - La microbiología de la descomposición celulósica y algunos problemas económicos concernientes a ella.- Botan Revu; 6; 637; 1940.

Webre A. L. and C. S. Robinson.- Evaporation.- The Chemical Catalog Co. Inc. 1926.

Worthington.- Standard Industrial Catalog.- W. D. 1099.- 918.